



# Итоги научной деятельности Шатурского филиала ОИВТ РАН в 2015 году

Директор ШФ ОИВТ РАН,  
к.ф.-м.н. Шурупов Алексей Васильевич

---



# Основные направления исследований и разработок

---

## По темам госбюджета

- Создание и исследование экспериментальных моделей мощных генераторов импульсов тока микросекундной длительности на базе взрывомагнитных генераторов и емкостных накопителей
- Расчетно-экспериментальные исследования плазмодинамических ускорителей макротел

## По внебюджетным направлениям

- Испытания мобильного испытательного комплекса на основе ВМГ (МИК ВМГ) на предельные нагрузки
- Оптимизация работы каскадного ВМГ при работе на переменную индуктивную нагрузку
- Разработка прибора непрерывного контроля влажности бумажно-масляной изоляции
- Испытания на взрывобезопасность высоковольтного маслонаполненного электрооборудования
- Разработка быстродействующих защитных устройств на основе взрывных коммутаторов
- Выполнение НИР по Гос. контракту № 6628

---

# РАБОТЫ ПО ГОСБЮДЖЕТУ

# Создание и исследование экспериментальных моделей мощных генераторов импульсов тока микросекундной длительности на базе взрывомагнитных генераторов и емкостных накопителей /Этап 2

## Исследование экспериментальных моделей на основе ЭН



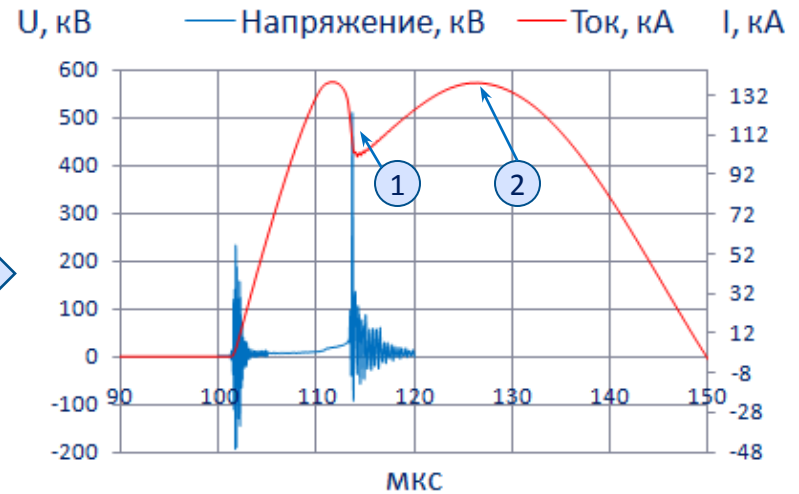
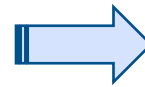
Экспериментальная модель,  $2 \times 2 \times 4 \text{ м}^3$

Параметры ЭН:

$$U_0 = 25 \text{ кВ}; C = 80 \text{ мкФ}; L_{\text{возд. линии}} = 3,4 \text{ мкГн}$$

Подбор параметров ЭВП осуществлялся на основе критериев подобия: постоянства отношения запасенной энергии к массе взрываемого проводника; «интеграла действия» и баланса энергии при взрыве:

$$\varnothing_{\text{ЭВП}} = 120 \text{ мкм}, \Lambda_{\text{ЭВП}} = 50 \text{ см}, N_{\text{ЭВП}} = 60 \text{ шт.}$$



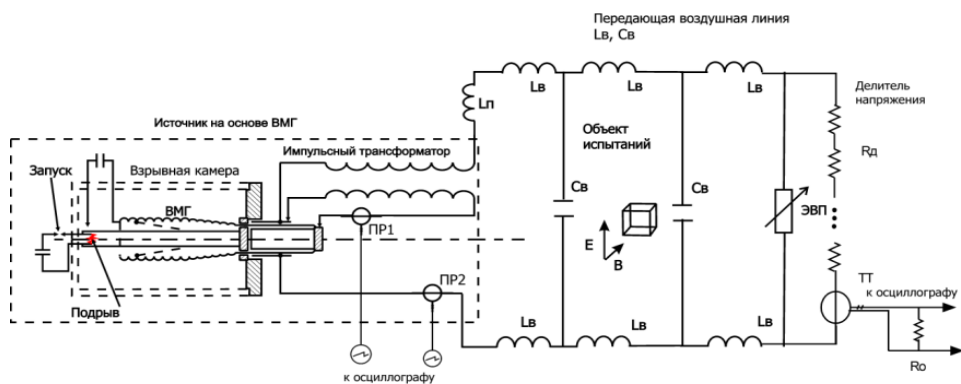
- 1 – Скачок напряжения через 3 мкс после первого максимума тока: начало взрыва и перевода вещества ЭВП в состояние пара;
- 2 – Второй максимум тока: переход в плазменное проводящее состояние вещества ЭВП

### Результаты эксперимента:

Максимальное значение тока	135 кА
Скорость роста сопротивления	$\sim 0,06 \text{ Ом/нс}$
Напряженность электрического поля	$\sim 350 \text{ кВ/м}$
Производная магнитной индукции $dB/dt$	$- 0,1 \text{ Тл/мкс}$

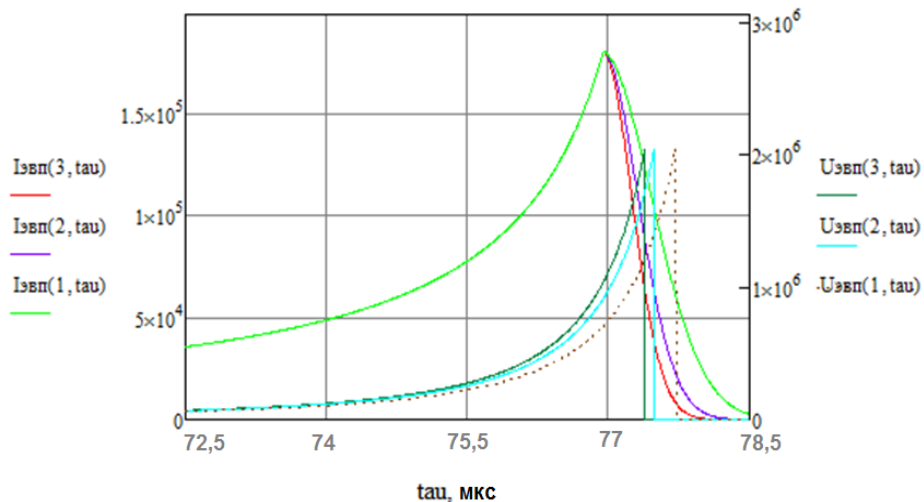
# Создание и исследование экспериментальных моделей мощных генераторов импульсов тока микросекундной длительности на базе взрывомагнитных генераторов и емкостных накопителей/Этап 2

## Исследование экспериментальных моделей на основе взрывомагнитного генератора



Принципиальная схема экспериментальной модели

Ток, А и напряжение, В



расчет тока и напряжения на ЗВП для разных ZVP:

— 0,06 Ом/нс, — 0,04 Ом/нс, — 0,02 Ом/нс



Экспериментальная модель 2×2×4 м<sup>3</sup>

### Начальные условия

ВМГ с трансформаторным выводом:

$L_{1T} - 0,085$  мкГн,  $L_{2T} - 8,8$  мкГн,  $k_c \sim 0,94$ ,  $W_{EH} - 27$  кДж

Нагрузка:  $L_n \sim 3$  мкГн,  $R_o \sim 0,2$  Ом

### Результаты моделирования

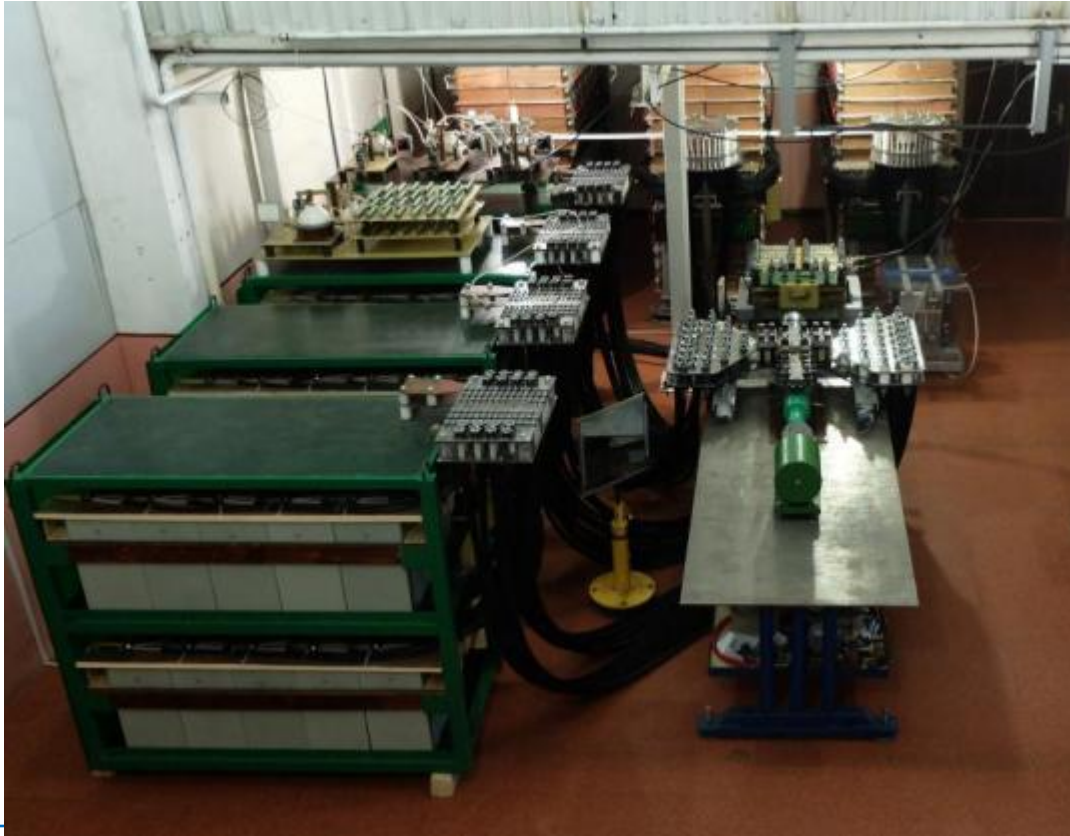
Максимальный ток ~ 180 кА

Напряженность электрического поля ~ 700 кВ/м

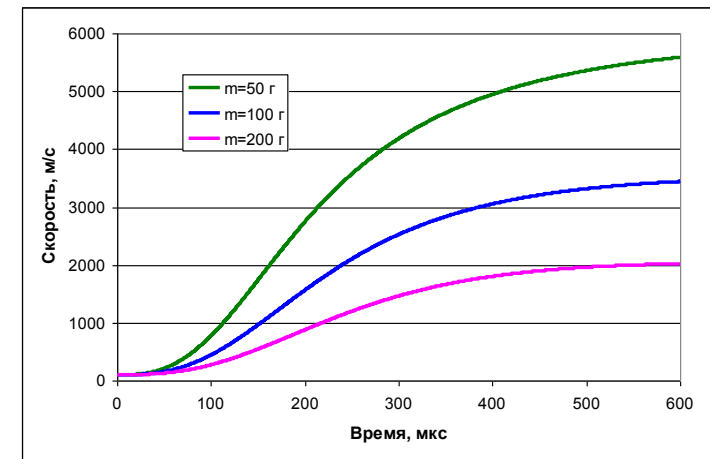
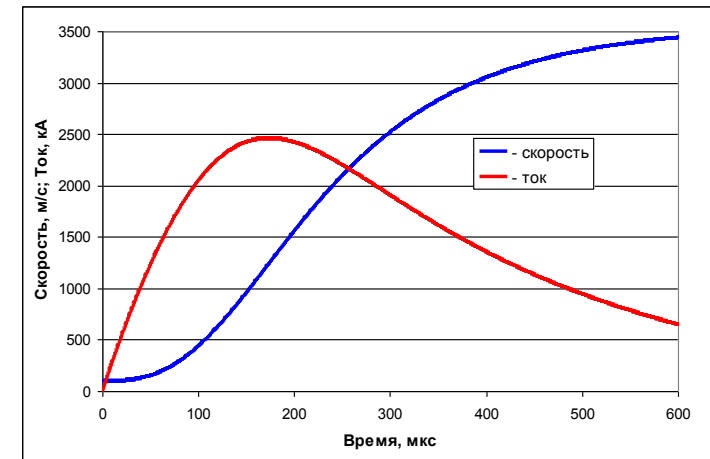
Производная магнитной индукции  $dB/dt$  - 0,6 Тл/мкс

# Расчетно-экспериментальные исследования плазодинамических ускорителей макротел

1. Значительно увеличены возможности емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) для рельсового ускорителя, который теперь представляет собой два блока: 4 секции 6 кВ 3,6 МДж и 3 секции 5 кВ на 1,2 МДж. Модернизированный ЕНЭ позволяет разгонять ударники массой порядка 0,1 кг до скорости свыше 3 км/с.



Расчет скорости ударника при использовании 4 секций на 3 МДж, напряжение зарядки – 5 кВ,  $m = 0,1$  кг





# Расчетно-экспериментальные исследования плазодинамических ускорителей макротел

## Метание «тяжелых» ударников

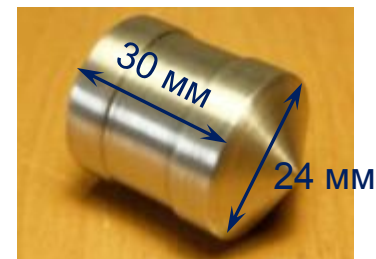


Стенд перед опытом

Скорость ударника на входе в рельсотрон  $\sim 0,2$  км/с  
Результирующая скорость  $\sim 2,1$  км/с  
Масса ударника после поражения мишени **15,2 г**.



Комбинированная мишень



Ударник массой **30 г**

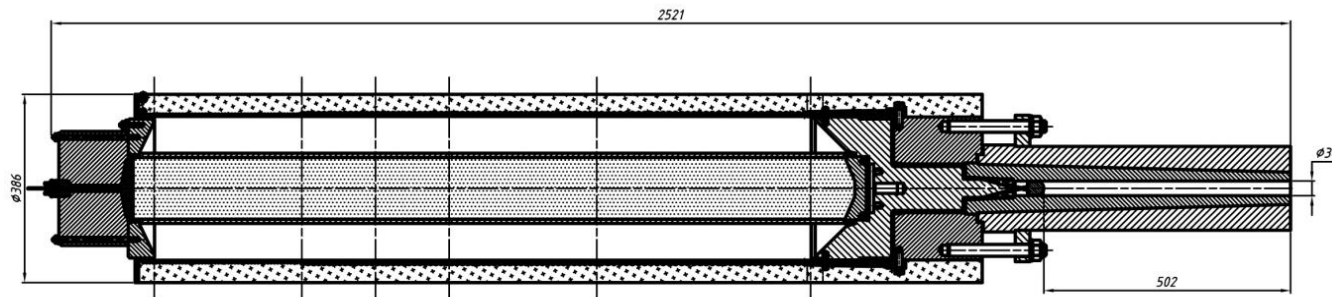


Мишень и ударник после опыта

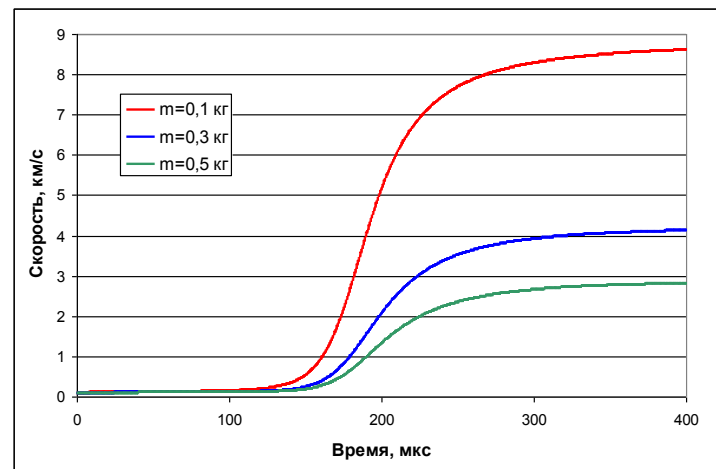
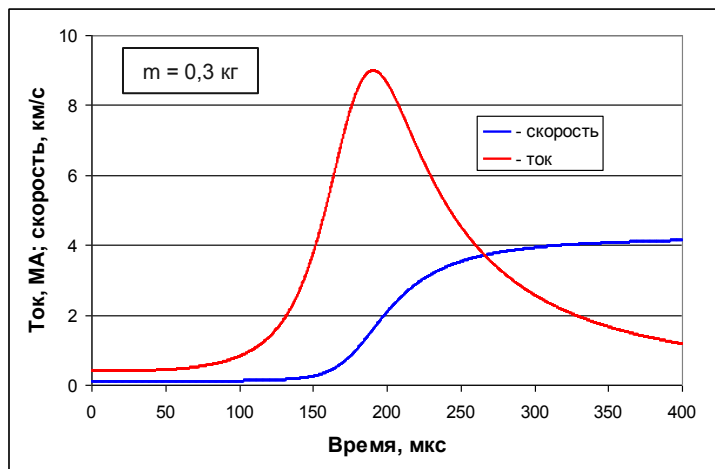
# Расчетно-экспериментальные исследования плазодинамических ускорителей макротел

2. Разработаны схемы и отработаны элементы конструкции мобильных метательных комплексов на основе магнитоплазменных ускорителей для ударников массой от 0,1 кг с источником энергии на основе ВМГ.

2.1 Коаксиальный ускоритель. Начальный источник энергии – ЕНЭ на 0,1 МДж, масса ВВ – 15 кг. При массе ударника 0,2 кг расчетная скорость метания - свыше 3 км/с.



2.2 Рельсовый ускоритель с двухкаскадным ВМГ на энергию 6 МДж



Расчет «идеального» режима работы рельсотрона



---

# РАБОТЫ ПО ВНЕБЮДЖЕТНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ

# Испытания мобильного испытательного комплекса на основе ВМГ (МИК ВМГ) на предельные нагрузки

Генератор токов молнии с трансформаторным выходом на нагрузку

Высоковольтный выход с делителем напряжения ДН1

Система управления

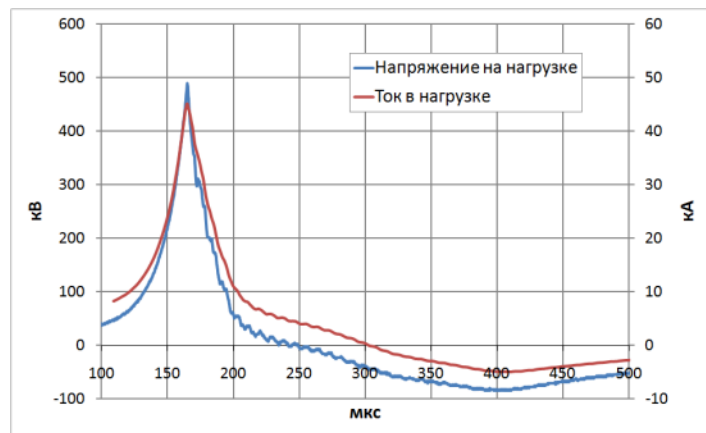
Линия передачи тока

Активная модельная нагрузка с делителем напряжения ДН2



МИК ВМГ на площадке ШФ ОИВТ РАН, октябрь 2015,  
Сопротивление активной нагрузки - 10 Ом, индуктивность контура - 150 мкГн

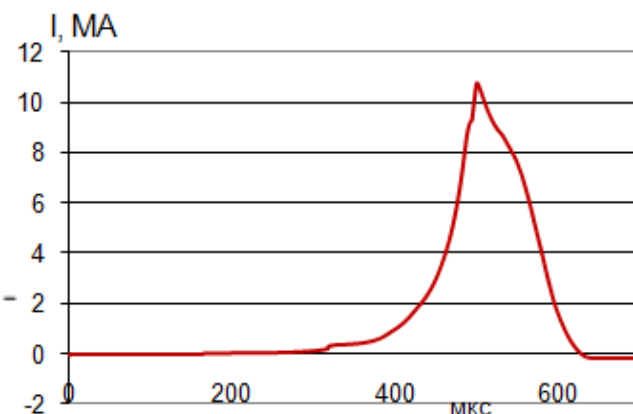
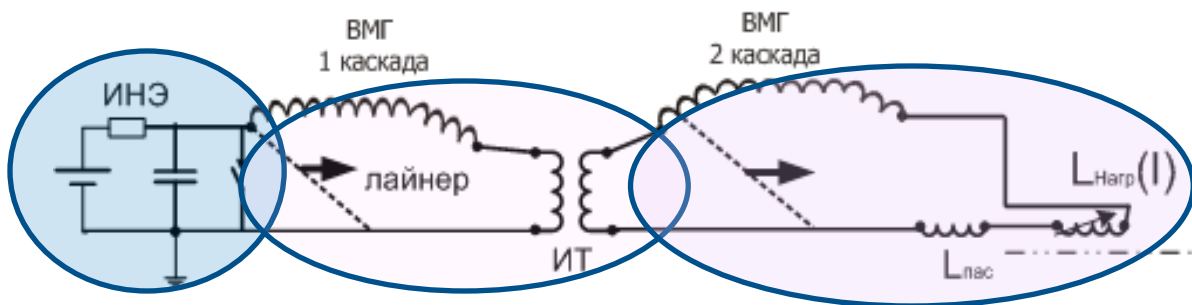
## Выходные параметры



Максимальная амплитуда тока ВМГ	6 МА
Амплитуда тока в нагрузке	45 кА
Энергия МИК ВМГ	1,68 МДж
Энергия в активной нагрузке	0,5 МДж
Напряжение на выходе МИК ВМГ	820 кВ
Напряжение на нагрузке	510 кВ
Длительность тока в нагрузке по ур. 0,5	50 мкс

# Оптимизация работы каскадного ВМГ при работе на переменную индуктивную нагрузку

Порядок расчета:



Ток в нагрузке  
(эксперимент после оптимизации)

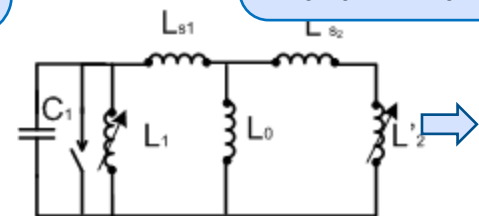
I. Оптимизация времени запитки 1 каск. ВМГ

II. Оптимизация трансформатора + синхронизация каскадов

III. Расчет на переменную нагрузку (сжимающаяся металлическая оболочка)

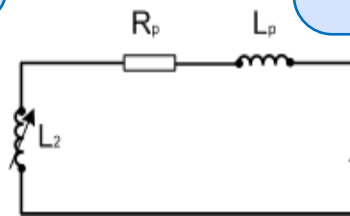
$$\frac{dL_1}{dt}(t); \frac{dL_2}{dt}(t)$$

Двумерный расчет закона вывода индуктивности. (FEMM 4.2.)



Электротехническая задача запитки второго каскада

$$R_0(t_0); L_2(t_0)$$



$$I(t_1); \frac{dI}{dt}(t_1)$$

Электродинамическая модель работы нагрузки, существенно зависящая от тока

$$t_2 = t_1 + \Delta t$$

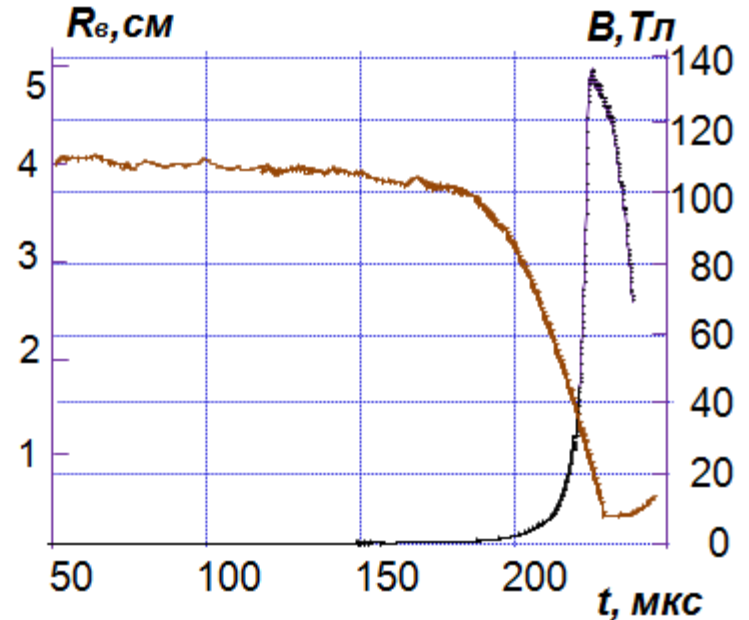
$$L(t_1); \frac{dL_2}{dt}(t_1)$$

# Сжатие плазмы металлической оболочкой

Впервые с помощью взрывомагнитного генератора получено десятикратное сжатие металлической оболочки (МО), помещенной в продольное магнитное поле



Оболочка после десятикратного сжатия вернулась к исходному размеру



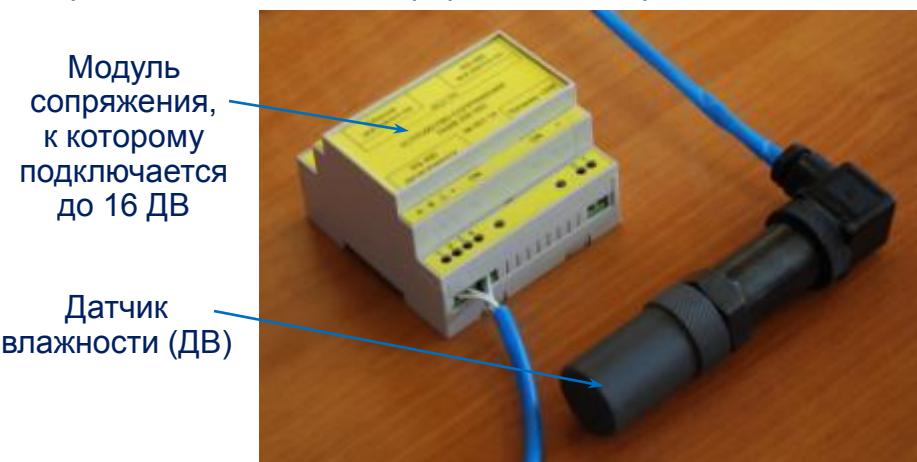
Динамика изменения радиуса МО ( $R_0$ ) и магнитного поля при сжатии

# Разработка прибора непрерывного контроля влажности бумажно-масляной изоляции (БМИ)

Завершены работы по созданию прибора непрерывного контроля влажности (ПНКВ) бумажно-масляной изоляции, которая выполнялась по заказу АО «ТЮМЕНЬЭНЕРГО».

ПНКВ основан на диэлькометрическом методе, т.е. зависимости диэлектрической проницаемости БМИ от влажности.

Эксплуатация маслонаполненного электрооборудования при влажности БМИ свыше 2% считается недопустимой. Обычно БМИ определяют пересчетом из влажности трансформаторного масла, что может приводить к большой погрешности. Методы непрерывного контроля влажности БМИ отсутствуют



Прибор непрерывного контроля влажности

ПНКВ на подстанции «Каскара» АО «Тюменьэнерго»

## Основные характеристики прибора:

диапазон измерения влажности (по массе)	до 4 %
погрешность измерения (по массе)	0,5 %
диапазон температур	-40 °С... +90° С
ресурс работы	80000 часов
поддерживает протоколы обмена с АСУ верхнего уровня в стандарте МЭК 60870-5-101 и МЭК 60870-5-104	

## По результатам разработки:

- получен патент на полезную модель
- представлен доклад на сессию CIGRE-2016, г. Париж
- в развитие работы создан индикатор влажности трансформаторного масла.



# Испытания на взрывобезопасность трансформатора тока типа ТОМ-110

Испытания являются сертификационными и достаточными для допуска электрооборудования в эксплуатацию на объектах ПАО «ФСК ЕЭС» и ПАО «Россети»



Взрывная камера с бездуговым источником импульсного давления

Трансформатор перед испытанием

Энергия воздействия 1 МДж, Энергия воздействия 1,5 МДж,  
пиковое давление 1 МПа пиковое давление 1,5 МПа



Трансформатор после опыта



Скоростная съемка испытаний

При энергии 1,5 МДж фрагменты корпуса трансформатора оказались за пределами нормируемой зоны безопасности

По результатам испытаний трансформатор тока типа ТОМ-110 производства ОАО «СЗТТ» признан взрывобезопасным при импульсном воздействии дугового разряда с энергией до 1 МДж.



# Разработка быстродействующих защитных устройств на основе взрывных коммутаторов

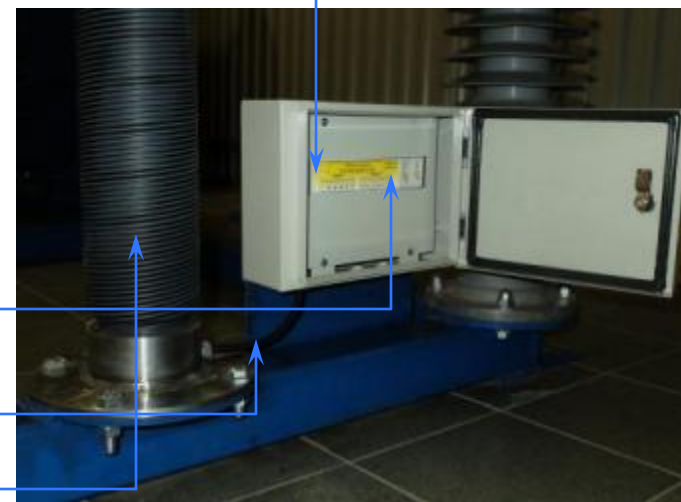
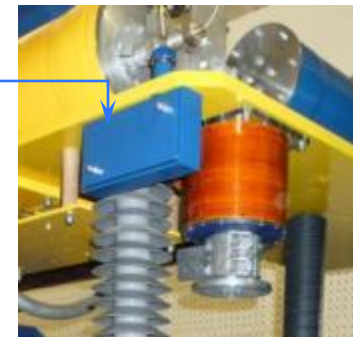
## Модернизация ТОУ-220 для установки на ПС «Каскадная» (Д№СТК-05/15)

▶ Доработана конструкторская документация на ТОУ-220 (содержит 259 листов)

▶ Проведена модернизация системы управления

▶ Разработано устройство интеграции с АСУ ТП ПС «Каскадная» в составе

1. Общий модуль устройства интеграции, выполняющий следующие функции:
  - ▶ контроль технического состояния СУ ТОУ-220 и передача сигналов о штатных и аварийных режимах работы сети
  - ▶ регистрация и архивирование срабатывания ТОУ-220
  - ▶ обеспечения действий на опережающее деление сети
2. Блок питания  $\pm 5$  В
3. Волоконно-оптическая линия связи с модулями цикла «Отключения» СУ ТОУ-220 (ВОЛС)
4. Снижение - устройство для спуска ВОЛС, находящуюся под высоким потенциалом



Связь СУ ТОУ-220 с АСУ ТП подстанции осуществляется по протоколу МЭК 61850

▶ Изготовлено оборудование ТОУ-220 (с учетом изменения компоновочных решений ТОУ-220 кВ)

# Разработка быстродействующих защитных устройств на основе взрывных коммутаторов

Модернизация ТОУ-220 для установки на ПС «Каскадная»



Общий вид ТОУ-220 на производственной площадке ШФ ОИВТ РАН

# Разработка быстродействующих защитных устройств на основе взрывных коммутаторов

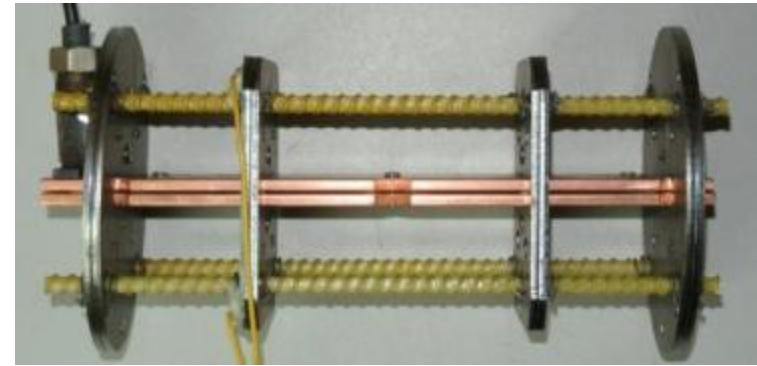
Быстродействующее защитное устройство (БЗУ) для высоковольтных сетей классом 35-110 кВ



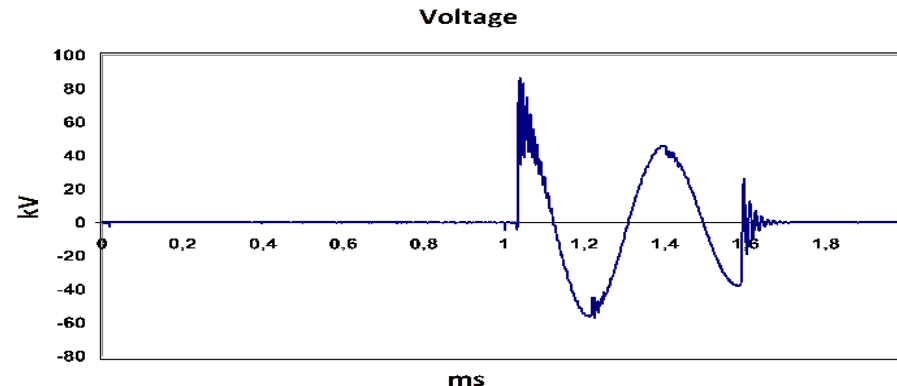
Взрывной коммутационный элемент ТОУ -220

## Принципиальные отличия от ТОУ-220:

- Упрощение конструкции
- Плоская геометрия шин
- Снижение массы ВМ на разрыв в 5-6 раз
- Исключение емкостного делителя
- Горячий резистор, ограничивающий перенапряжения при срабатывании



Взрывной коммутационный элемент БЗУ



Напряжение на взрывном размыкателе БЗУ

Пробойное напряжение на взрывном коммутационном элементе БЗУ определяется электрической прочностью поверхности его корпуса!!!

# ГК № 6628 на выполнение НИР шифр «Пирог» / 2 этап

В рамках 2 этапа проведены в ФКП «НИИ Геодезия» 12 полигонных взрывных испытаний составляющих элементов и 5 (3 успешных) полигонных испытания экспериментальных образцов устройства.

**Масса ВМ (4 заряда) в экспериментальном образце - около 300 кг в тротиловом эквиваленте**

Для получения требуемых по ТЗ параметров рабочего тела разработаны, изготовлены и испытаны:

- 7 каскадных ВМГ, обеспечивающих в нагрузке индуктивностью 20 - 55 нГн импульс тока с фронтом 50-80 мкс, амплитудой до 18 МА и энергией до 8 МДж,
- 8 ВМГ, обеспечивающих в переменной нагрузке индуктивностью 30 - 140 нГн импульс тока с фронтом 10 мкс, амплитудой до 5 МА и энергией до 0,5 МДж.

Разработаны: система дистанционного управления установкой,  
устройства синхронизации процессов,  
приборы регистрации параметров, включающие уникальные датчики.

# ГК № 6628 на выполнение НИР шифр «Пирог» / 2 этап



В состав установки входили емкостные накопители с параметрами:

- напряжение 50 кВ, энергия 105 кДж – 2 шт.
- напряжение 24 кВ, энергия 250 кДж – 2 шт.
- напряжение 3 кВ, энергия 0,6 МДж
- напряжение 6 кВ, энергия 3,6 МДж



# Публикации Шатурского филиала ОИВТ РАН в 2015 г.

---

**Всего публикаций – 17**

**В том числе:**

**рецензируемые журналы и сборники – 5**

**нерецензируемые журналы – 1**

**доклады на международных и российских конференциях – 7**

**тезисы докладов на международных и российских конференциях – 3**

**патент – 1**

**Средний ПРД по Филиалу около 20**

**Среднемесячная заработная плата – 74689 руб.**



